

ISSN : 2528-7400
e-ISSN : 2615-871X

ANALISIS PENYALURAN DAYA LISTRIK PADA SALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI 150 KV DARI PLTU BUKIT ASAM KE GARDU INDUK KERAMASAN PALEMBANG

Abdul Azis¹, Irine Kartika Pebrianti²

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas PGRI Palembang
azis@univpgri-palembang.ac.id¹, irinekf@univpgri-palembang.ac.id²

ABSTRAK

Jatuh tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi selain dipengaruhi oleh rugi-rugi korona juga dipengaruhi jenis kawat penghantar; luas penampang kawat penghantar; panjang kawat penghantar; resistansi, induktansi, kapasitansi kawat penghantar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyaluran daya listrik pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV dari PLTU Bukit Asam ke Gardu Induk Keramasan Palembang. Metode penelitian kasus berdasarkan pengumpulan data pada objek kajian. Dari penelitian diperoleh hasil bahwa jatuh tegangan pada saluran transmisi adalah sebesar 5,1669 kV atau 3,4677 %. Kemudian rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV adalah 17 % atau 6,5524 MW, sehingga efisiensi penyaluran daya adalah 83,7973 % atau daya pada ujung penerima sebesar 32 MW.

Kata Kunci: Tegangan, Daya, Efisiensi

I. PENDAHULUAN

Saluran transmisi berfungsi untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban, dan biasanya jarak antara pusat pembangkit ke pusat-pusat beban cukup jauh. Jauhnya jarak antara pembangkit dengan beban, akan menimbulkan penurunan kualitas tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Untuk mengurangi penurunan kualitas tegangan dan rugi-rugi daya di sepanjang saluran transmisi, maka dalam penyaluran energi listrik digunakan tegangan tinggi (Arismunandar, 2001). Penggunaan tegangan tinggi pada saluran transmisi mempunyai nilai ekonomis, karena untuk penyaluran daya yang sama arus yang dialirkan menjadi berkurang. Kemudian penggunaan bahan tembaga pada konduktor akan berkurang karena luas penampang konduktor yang digunakan berkurang.

Pada saluran transmisi tenaga listrik terdapat jatuh tegangan dan rugi-rugi daya yang disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu jenis kawat penghantar, luas penampang kawat penghantar, panjang kawat penghantar, resistansi, induktansi, dan kapasitansi kawat penghantar (Kadir, 1998). Hal ini terjadi apabila tegangan pada pangkal pengiriman dengan tegangan pada ujung penerimaan ada perbedaan, dalam sistem normal, tegangan tertinggi dan terendah perbedaannya tidak lebih dari ± 10 % dari tegangan nominal sistem (BSN, 2003), kemudian apabila efisiensi penyaluran daya pada saluran transmisi semakin kecil. Oleh karena itu, maka akan dilakukan penelitian mengenai Analisis Penyaluran Daya Listrik Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV Dari PLTU Bukit Asam Ke Gardu Induk Keramasan Palembang.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Klasifikasi Saluran Transmisi Untuk Keperluan Diagram Pengganti

Saluran transmisi merupakan komponen yang sangat penting dalam sebuah sistem tenaga listrik, karena saluran transmisi merupakan penghubung antara pusat pembangkit dan beban. Sehingga saluran transmisi harus dapat menjamin ketersediaan energi listrik secara kontinu pada setiap beban yang terhubung dalam sebuah sistem. Karena permukaan tanah tidak selalu dalam kondisi datar dan terkadang saluran transmisi harus melewati bukit-bukit, maka saluran transmisi udara lebih dipilih dibandingkan saluran transmisi bawah tanah (Arismunandar dan Kuwahara, 2004). Untuk keperluan analisa dan perhitungan maka digunakan diagram pengganti saluran transmisi. Diagram pengganti saluran transmisi dibagi dalam tiga kelas, yaitu: kawat pendek, kawat menengah dan kawat panjang (Hutauruk, 1996).

1. Kawat pendek

Kawat pendek merupakan saluran transmisi yang mempunyai panjang kurang dari 80 km (< 80 km). Apabila kapasitansi kecil, dengan demikian besar arus bocor ke tanah kecil terhadap arus beban, maka kapasitansi ke tanah dapat diabaikan, dan dinamakan kawat pendek (Hutauruk, 1996).

2. Kawat menengah

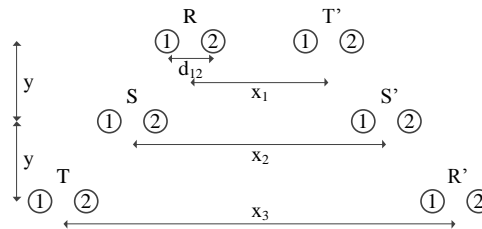
Kawat menengah merupakan saluran transmisi yang mempunyai panjang 80 km sampai dengan 250 km (80 km - 250 km). Apabila kapasitansi sudah mulai besar sehingga tidak dapat diabaikan, tetapi belum begitu besar sehingga masih dapat dianggap seperti kapasitansi terpusat, dan dinamakan kawat menengah. Pada saluran transmisi kawat menengah, kapasitansi itu dapat dipusatkan pada satu titik (nominal T), atau pada dua titik (nominal π) (Hutauruk, 1996).

3. Kawat panjang

Kawat panjang merupakan saluran transmisi yang mempunyai panjang lebih dari 250 km (> 250 km). Apabila kapasitansi itu besar sekali sehingga tidak mungkin lagi dianggap kapasitansi terpusat, dan harus dianggap terbagi rata sepanjang saluran, maka dalam hal ini dinamakan kawat panjang (Hutauruk, 1996).

B. GMR Dan GMD Konduktor Berkas

Untuk menganalisis penyaluran daya listrik SUTT 150 kV tiga fase dengan konstruksi sirkit ganda dengan dua konduktor berkas, maka harus ditentukan terlebih dahulu nilai *GMR* (*Geometric Mean Radius*) dan *GMD* (*Geometric Mean Distance*) dari konduktor berkas (Hutauruk, 1996).



Gambar 1. Representasi Saluran Transmisi Sirkit Ganda Dengan Dua Konduktor Berkas

1. *GMR* Konduktor Berkas

GMR (*Geometric Mean Radius*) adalah jari-jari rata-rata geometris konduktor berkas. Dalam menentukan *GMR* dari suatu saluran transmisi yang ditinjau adalah satu fase, karena dalam sistem tiga fase *GMR* tiap fase dianggap sama jika fase ditransposisi agar reaktansi induktif tiap fase seimbang. Untuk mendapatkan nilai *GMR* konduktor berkas per fase, harus ditentukan terlebih dahulu *GMR* dalam tiga kedudukan, yaitu $R - R'$, $S - S'$, $T - T'$. Dari gambar 1, nilai *GMR* dapat ditentukan, yaitu:

$$r' = r \epsilon^{-1/4} \quad (1)$$

Dimana:

$r' = GMR$ dari sub-konduktor berkas (m)

$r =$ Jari-jari dari sub-konduktor berkas (m)

Kemudian dapat ditentukan *GMR* dari konduktor berkas, yaitu:

$$D_{sb} = \sqrt{r' \cdot d_{12} \cdot r' \cdot d_{21}} \text{ dan jika } d_{12} = d_{21}, \text{ maka:} \\ D_{sb} = \sqrt[4]{r' \cdot d_{12} \cdot r' \cdot d_{12}} = \sqrt[4]{(r')^2 \cdot (d_{12})^2} = \sqrt{r' \cdot d_{12}} \quad (2)$$

Dimana:

$D_{sb} = GMR$ dari konduktor berkas (m)

$d_{12} = d_{21} =$ jarak antar sub konduktor berkas (m)

Selanjutnya dapat ditentukan *GMR* untuk ketiga kedudukan tersebut, yaitu:

$$\begin{aligned} - GMR_{R-R'} \text{ dalam kedudukan } R - R' \\ GMR_{R-R'} = \sqrt[4]{D_{sb} \cdot D_{RR'} \cdot D_{sb} \cdot D_{R'R}} \text{ dan jika } D_{RR'} = D_{R'R}, \text{ maka:} \\ GMR_{R-R'} = \sqrt[4]{(D_{sb})^2 \cdot (D_{RR'})^2} = \sqrt{D_{sb} \cdot D_{RR'}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} - GMR_{S-S'} \text{ dalam kedudukan } S - S' \\ GMR_{S-S'} = \sqrt[4]{D_{sb} \cdot D_{SS'} \cdot D_{sb} \cdot D_{S'S}} \text{ dan jika } D_{SS'} = D_{S'S}, \text{ maka:} \\ GMR_{S-S'} = \sqrt[4]{(D_{sb})^2 \cdot (D_{SS'})^2} = \sqrt{D_{sb} \cdot D_{SS'}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} - GMR_{T-T'} \text{ dalam kedudukan } T - T' \\ GMR_{T-T'} = \sqrt[4]{D_{sb} \cdot D_{TT'} \cdot D_{sb} \cdot D_{T'T}} \text{ dan jika } D_{TT'} = D_{T'T}, \text{ maka:} \\ GMR_{T-T'} = \sqrt[4]{(D_{sb})^2 \cdot (D_{TT'})^2} = \sqrt{D_{sb} \cdot D_{TT'}} \end{aligned} \quad (5)$$

Maka *GMR* dari konduktor berkas per fase adalah:

$$GMR = \sqrt[3]{GMR_{R-R'} \cdot GMR_{S-S'} \cdot GMR_{T-T'}} \quad (6)$$

2. *GMD* Konduktor Berkas

GMD (*Geometric Mean Distance*) adalah jarak rata-rata geometris dari ketiga jarak konduktor. Untuk mendapatkan nilai *GMD*, harus ditentukan terlebih dahulu *GMD* antara tiap kelompok fase, yaitu *R-S*, *S-T*, *T-R*. Dari gambar 1, nilai *GMD* dapat ditentukan, yaitu:

$$- \text{ } GMD \text{ antara fase } R \text{ dan fase } S \\ GMD_{R-S} = \sqrt[4]{D_{RS} \cdot D_{SR'} \cdot D_{R'S'} \cdot D_{S'R}} \quad (7)$$

$$- \text{ } GMD \text{ antara fase } S \text{ dan fase } T \\ GMD_{S-T} = \sqrt[4]{D_{ST} \cdot D_{TS'} \cdot D_{S'T'} \cdot D_{T'S}} \quad (8)$$

$$- \text{ } GMD \text{ antara fase } T \text{ dan fase } R \\ GMD_{T-R} = \sqrt[4]{D_{TR} \cdot D_{RT'} \cdot D_{T'R'} \cdot D_{R'T}} \quad (9)$$

$$- \text{ Maka } GMD \text{ dari konduktor berkas per fase adalah:} \\ GMD = \sqrt[3]{GMD_{R-S} \cdot GMD_{S-T} \cdot GMD_{T-R}} \quad (10)$$

C. Parameter Konduktor Berkas

1. Resistansi Konduktor Berkas

Secara umum konduktor terdiri dari kawat pilin, dan untuk menentukan pengaruh dari pilin maka resistansi konduktor (R_{t1}) dikalikan faktor koreksi 1,02. Pada saat konduktor dialiri arus maka nilai resistansi konduktor akan berubah dalam batas temperatur 20°C - 100°C . Nilai resistansi konduktor setelah adanya kenaikan temperatur (R_{t2}) dapat ditentukan (Hutauruk, 1996):

$$R_{t2} = K_r R_{t1} (1 + \alpha_{t1}(t_2 - t_1)) \quad (11)$$

2. Reaktansi Induktif Konduktor Berkas

Nilai induktansi (L) per fase saluran transmisi sirkit ganda dengan dua konduktor berkas dapat ditentukan (Hutauruk, 1996):

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR} \text{ H/m/konduktor} \quad (12)$$

Nilai reaktansi induktif per fase dapat ditentukan (Hutauruk, 1996):

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L \text{ } \Omega/\text{m/konduktor} \quad (13)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (12) kedalam persamaan (13), maka nilai reaktansi induktif per fase untuk konduktor berkas menjadi (Hutauruk, 1996):

$$X_L = 0,14467 \log \frac{GMD}{GMR} \text{ } \Omega/\text{km/konduktor} \quad (14)$$

3. Reaktansi Kapasitif Konduktor Berkas

Nilai kapasitansi (C) per fase saluran transmisi sirkit ganda dengan dua konduktor berkas dapat ditentukan (Hutauruk, 1996):

$$C = \frac{2\pi k}{\ln GMD/GMR} \text{ Farad/m/konduktor} \quad (15)$$

Nilai reaktansi kapasitif per fase dapat ditentukan (Hutauruk, 1996):

$$X_C = -\frac{1}{\omega \cdot C} = -\frac{1}{2\pi f \cdot C} \text{ } \Omega/\text{m/konduktor} \quad (16)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (15) kedalam persamaan (16), maka nilai reaktansi kapasitif per fase untuk konduktor berkas menjadi (Hutauruk, 1996):

$$X_C = -0,1317 \log \frac{GMD}{GMR} \text{ M}\Omega/\text{km/konduktor} \quad (17)$$

D. Konstanta Konduktor Berkas

1. Impedansi Konduktor Berkas

Resistansi dan induktansi itu secara seragam tersebar sepanjang saluran dalam bentuk impedansi seri (*series impedance*) (Stevenson, 2000). Nilai impedansi pada saluran transmisi dapat ditentukan (Hutauruk, 1996):

$$Z = z l = (R + jX_L)l \quad (18)$$

Dimana :

Z = impedansi seri saluran transmisi (Ω/km)

R = resistansi saluran transmisi (Ω/km)

X_L = reaktansi induktif saluran transmisi (Ω/km)

l = panjang saluran transmisi (Ω/km)

2. Admitansi Konduktor Berkas

Kapasitansi terdapat di antara penghantar pada saluran fasa tunggal atau dari sebuah penghantar ke netral pada saluran fasa tiga membentuk admintansi simpang (*shunt admittance*) (Stevenson, 2000). Nilai admitansi pada saluran transmisi dapat ditentukan (Hutauruk, 1996):

$$Y = \frac{1}{jX_C} l \quad (19)$$

Dimana :

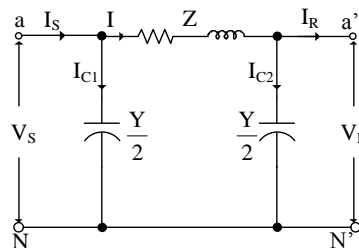
Y = admitansi seri saluran transmisi (Ω/km)

X_C = reaktansi kapasitif saluran transmisi (Ω/km)

l = panjang saluran transmisi (Ω/km)

E. Penyaluran Daya Listrik Saluran Transmisi Menengah Nominal π

Saluran transmisi menengah nominal π merupakan saluran transmisi dengan kapasitansi dipusatkan pada dua titik dan impedansi serinya dipusatkan satu titik (Gonen, 2014).



Gambar 2. Diagram Pengganti Saluran Transmisi Menengah Nominal π (Gonen, 2014)

Dari gambar 2 diatas, dapat ditentukan persamaan untuk tegangan saluran pada ujung pengirim (Gonen, 2014):

$$V_S = V_R + I \cdot Z \text{ dan jika: } I = I_R + I_{C2} = I_R + V_R \frac{Y}{2}$$

Maka tegangan saluran pada ujung pengirim menjadi (Gonen, 2014):

$$V_S = V_R \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) + I_R Z \quad (20)$$

Kemudian dari gambar 2 diatas, dapat ditentukan arus pada ujung pengirim (Gonen, 2014):

$$I_S = I + I_{C1} \text{ dan jika: } I_{C1} = V_S \frac{Y}{2}$$

Maka arus pada ujung pengirim menjadi (Gonen, 2014):

$$I_S = V_R Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) + I_R \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) \quad (21)$$

Setelah nilai V_S didapatkan, maka persentase regulasi tegangan dapat ditentukan (Gonen, 2014):

$$V_S(\%) = \frac{\left| \frac{V_S}{1 + \frac{YZ}{2}} \right| - |V_R|}{|V_R|} 100 \% \quad (22)$$

Setelah nilai V_S dan I_S didapatkan, maka nilai daya pada ujung pengirim dapat ditentukan (Gonen, 2014):

$$P_S = \sqrt{3} V_S I_S \cos \theta_S \quad (23)$$

Dimana : $\theta_S = \theta_{V_S} - \theta_{I_S}$ (24)

Selanjutnya dapat ditentukan efisiensi penyaluran daya (η) (Gonen, 2014):

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} 100 \% \quad (25)$$

Dimana :

V_S = Tegangan saluran pada ujung pengirim (V)

V_R = Tegangan saluran pada ujung penerima (V)

I_S = Arus pada ujung pengirim (A)

I_R = Arus pada ujung penerima (A)

Z = impedansi seri saluran transmisi (Ω)

Y = admitansi seri saluran transmisi (Ω)

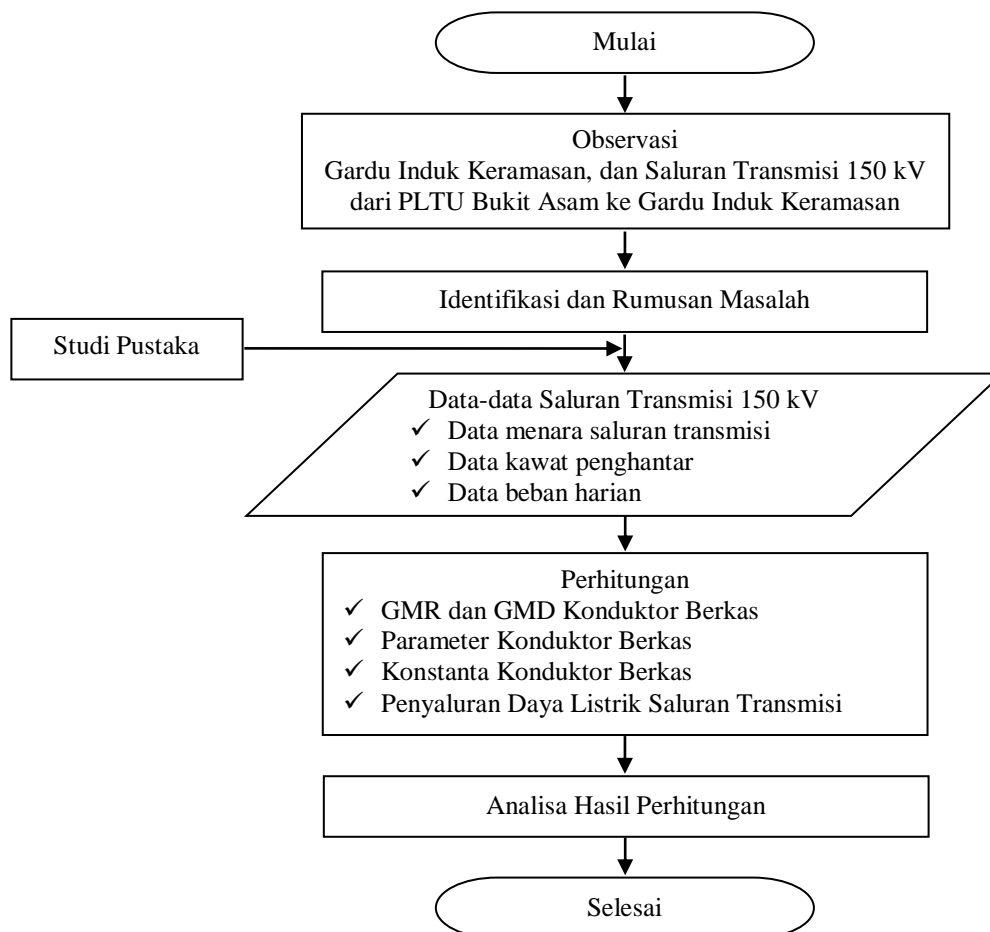
η = Efisiensi penyaluran daya pada saluran transmisi (%)

P_S = Daya pada ujung pengirim (kW)

P_R = Daya pada ujung penerima (kW)

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyaluran daya listrik pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV dari PLTU Bukit Asam Ke Gardu Induk Keramasan Palembang. Diagram alir metode penelitian dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Metode Penelitian

Penelitian dimulai dengan melakukan observasi ke lokasi penelitian, kemudian melakukan pengumpulan data operasional berupa data menara saluran transmisi, data kawat penghantar, data beban harian. Data yang sudah didapatkan kemudian dianalisa dan selanjutnya diproses agar dapat dipergunakan dalam perhitungan-perhitungan guna mendapatkan *GMR* dan *GMD*, parameter konduktor berkas, konstanta konduktor berkas, penyaluran daya listrik meliputi tegangan, arus, daya pada ujung pengirim, persentase regulasi tegangan dan efisiensi penyaluran daya. Selanjutnya menganalisa semua hasil perhitungan, kemudian menganalisis penyaluran daya listrik pada SUTT 150 kV.

IV. PERHITUNGAN DAN ANALISA

SUTT 150 kV dari PLTU Bukit Asam Tanjung Enim ke Gardu Induk Keramasan Palembang menggunakan jenis/type kawat ACSR/Hawk dan ditopang oleh menara sirkit ganda yang menggunakan dua konduktor berkas per fase (*Twin Conductor*) dengan jumlah *strand* 21 Al + 7 St. Panjang SUTT adalah 162,73 km dengan 444 menara transmisi, dan mempunyai jarak antara menara transmisi berkisar antara 350 meter sampai dengan 400 meter. Menara yang digunakan pada SUTT 150 kV adalah Menara Gantung (*Suspension Tower*), Menara Penegang (*Tension Tower*), dan Menara Ujung (*Dead End Tower*). Menara Gantung digunakan pada saluran yang masih dalam satu garis lurus, Menara Penegang digunakan untuk memperkuat tarikan pada penghantar saluran, sedangkan Menara Ujung digunakan untuk merentangkan penghantar di ujung saluran. Tipe menara yang digunakan adalah tipe AA dengan tinggi 34,3 meter, tipe BB dan tipe CC dengan tinggi 34,0 meter.

A. Data

1. Data Saluran Transmisi

a. Konstruksi menara

- Tipe menara : AA, BB, CC
- Tinggi menara rata-rata (h_m) : 34,15 m
- Panjang *upper cross arm* rata-rata (x_1) : 7,7 m
- Panjang *middle cross arm* rata-rata (x_2) : 8,1 m
- Panjang *bootom cross arm* rata-rata (x_3) : 8,5 m
- Jarak antara menara rata-rata (S) : 370,49 m
- Andongan rata-rata (D) : 1,92 m

b. Kawat penghantar

- Luas penampang terhitung : 281,1 mm²
- Diameter kawat penghantar : 21,8 mm = 0,0218 m
- Jari-jari kawat penghantar (r) : 10,9 mm = 0,0109 m
- Jarak antar konduktor berkas (d_{12}) : 40 cm = 0,4 m
- Resistansi 20°C : 0,1195 Ω /km

2. Data Beban Harian

Beban harian merupakan arus yang disalurkan dari PLTU Bukit Asam Tanjung Enim ke Gardu Induk Keramasan Palembang tiap jam setiap hari, selama satu bulan. Data beban harian rata-rata selama Bulan Juli 2017 pada Gardu Induk Keramasan Palembang yaitu tegangan pada ujung penerima (V_R), arus pada ujung penerima (I_R), dan daya pada ujung penerima (P_R), bisa dilihat dalam Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Data Beban Harian Rata-Rata Bulan Juli 2017

Jam	V_R (kV)	I_R (A)	P_R (MW)	Jam	V_R (kV)	I_R (A)	P_R (MW)
00:00	150	130	29	14:00	147	174	38
01:00	151	122	27	15:00	147	174	38
02:00	151	118	26	16:00	147	162	36
03:00	152	115	25	17:00	148	154	34
04:00	152	113	25	18:00	148	157	35
05:00	152	109	25	18:30	148	158	37
06:00	151	108	24	19:00	148	164	38
07:00	151	112	25	19:30	148	164	38
08:00	150	123	28	20:00	148	165	38
09:00	148	144	32	21:00	148	163	37
10:00	148	156	35	22:00	149	150	33
11:00	148	163	37	23:00	149	138	30
12:00	148	169	37	24:00	150	128	29
13:00	147	167	37	Rata-rata	149	144	32

Sumber : Pengolahan Data

B. Perhitungan

1. GMR dan GMD Konduktor Berkas

a. GMR Konduktor Berkas

GMR dari sub-konduktor berkas (r') bisa ditentukan dengan persamaan (1) sebagai berikut:

$$r' = r \varepsilon^{-1/4} = 0,0109 \cdot 0,7788 = 8,4889 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

GMR dari konduktor berkas dengan jarak antar sub konduktor berkas $d_{12} = d_{21} = 0,40 \text{ m}$ bisa ditentukan dengan persamaan (2) sebagai berikut:

$$D_{sb} = \sqrt{r' \cdot d_{12}} = \sqrt{8,4889 \cdot 10^{-3} \cdot 0,40} = 0,05827153 = 5,8272 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Maka nilai GMR dari konduktor sub-konduktor berkas dapat ditentukan berdasarkan tiga kedudukan $R - R', S - S', T - T'$, yaitu:

$$- GMR_{R-R'} = \sqrt{D_{sb} \cdot D_{RR'}} = \sqrt{5,8272 \cdot 10^{-2} \cdot 12,4740} = 0,8526 \text{ m}$$

$$- GMR_{S-S'} = \sqrt{D_{sb} \cdot D_{SS'}} = \sqrt{5,8272 \cdot 10^{-2} \cdot 8,2} = 0,6912 \text{ m}$$

$$- GMR_{T-T'} = \sqrt{D_{sb} \cdot D_{TT'}} = \sqrt{5,8272 \cdot 10^{-2} \cdot 12,4740} = 0,8526 \text{ m}$$

Maka GMR dari konduktor berkas per fase, adalah:

$$- GMR = \sqrt[3]{GMR_{R-R'} \cdot GMR_{S-S'} \cdot GMR_{T-T'}} = \sqrt[3]{0,8526 \cdot 0,6912 \cdot 0,8526} = 0,7950 \text{ m}$$

b. GMD Konduktor Berkas

Untuk mendapatkan nilai GMD, harus ditentukan terlebih dahulu GMD antara tiap kelompok fase ($R-S, S-T, T-R$) untuk mendapatkan GMD dari konduktor berkas per fase.

$$- GMD_{R-S} = \sqrt[4]{D_{RS} \cdot D_{SR'} \cdot D_{R'S'} \cdot D_{S'R}} = \sqrt[4]{4,7043 \cdot 9,6255 \cdot 4,7043 \cdot 9,2785} = 7,3077 \text{ m}$$

$$- GMD_{S-T} = \sqrt[4]{D_{ST} \cdot D_{TS'} \cdot D_{S'T'} \cdot D_{T'S}} = \sqrt[4]{4,7043 \cdot 9,6255 \cdot 4,7043 \cdot 9,2785} = 7,3077 \text{ m}$$

$$- GMD_{T-R} = \sqrt[4]{D_{TR} \cdot D_{RT'} \cdot D_{T'R'} \cdot D_{RT}} = \sqrt[4]{9,4085 \cdot 7,8 \cdot 9,4085 \cdot 8,6} = 8,7783 \text{ m}$$

Maka GMD dari konduktor berkas per fase, adalah:

$$GMD = \sqrt[3]{GMD_{R-S} \cdot GMD_{S-T} \cdot GMD_{T-R}} = \sqrt[3]{7,3077 \cdot 7,3077 \cdot 8,7783} = 7,3077 \text{ m}$$

2. Parameter Konduktor Berkas

a. Resistansi Konduktor Berkas

Resistansi konduktor bisa ditentukan dengan persamaan (11) sebagai berikut:

$$R_{t2} = K_r R_{t1} (1 + \alpha_{t1}(t_2 - t_1)) = 1,02 \cdot 0,1195 (1 + 4,03 \cdot 10^{-3}(25 - 20))$$

$$R_{t2} = 0,1243 \text{ } \Omega/\text{km/konduktor}$$

b. Reaktansi Induktif Konduktor Berkas

Reaktansi induktif bisa ditentukan dengan persamaan (14) sebagai berikut:

$$X_L = 0,14467 \log \frac{GMD}{GMR} = 0,14467 \log \frac{7,3077}{0,7950} = 0,1394 \text{ } \Omega/\text{km/konduktor}$$

c. Reaktansi Kapasitif Konduktor Berkas

Reaktansi kapasitif per fase bisa ditentukan dengan persamaan (17) sebagai berikut:

$$X_C = -0,1317 \log \frac{GMD}{GMR} = -0,1317 \log \frac{7,3077}{0,7950} = -0,1260 \text{ M}\Omega/\text{km/konduktor}$$

3. Konstanta Konduktor Berkas

a. Impedansi Konduktor Berkas

Impedansi merupakan resistansi (R) dan induktansi (X_L) yang secara seragam tersebar sepanjang saluran. Nilai impedansi pada saluran transmisi bisa ditentukan dengan persamaan (18):

$$Z = (R + jX_L)l = (0,1243 + j 0,1394)162,73 = 20,2348 + j 22,6809 = 30,3953 \angle 48,2622^\circ \text{ } \Omega/\text{konduktor}$$

b. Admitansi Konduktor Berkas

Admitansi merupakan kapasitansi (X_C) yang terdapat di antara sebuah penghantar ke netral pada saluran fasa tiga. Nilai admitansi pada saluran transmisi dapat ditentukan dengan persamaan (19) sebagai berikut:

$$Y = \frac{1}{jX_C l} = \frac{1}{-j 126,882,0839 \cdot 162,73} = 4,8432 \cdot 10^{-8} \angle 90^\circ = 2,96682 \cdot 10^{-24} + j 4,8432 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega/\text{konduktor}$$

C. Analisa Penyaluran Daya Listrik Pada SUTT 150 kV

1. Jatuh Tegangan Pada SUTT 150 kV

Dari data beban harian rata-rata Bulan Juli 2017 pada Tabel 1 dapat diketahui bahwa: $I_R = 144 \text{ A}$,

$$V_{R(L-L)} = 149 \text{ kV} = 149.000 \text{ V} \text{ maka } V_{R(L-N)} = 149.000/\sqrt{3} = 86.024,4531 \text{ V}$$

Tegangan saluran pada ujung pengirim bisa ditentukan dengan persamaan (20) sebagai berikut:

$$V_{S(L-N)} = V_R \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) + I_R Z$$

$$V_{S(L-N)} = 86.024,4531 \left(1 + \frac{(4,8432 \cdot 10^{-8} \angle 90^\circ)(30,3953 \angle 48,2622^\circ)}{2}\right) + 144 (30,3953 \angle 48,2622^\circ)$$

$$V_{S(L-N)} = 88.947,8916 + j 3276,879331 = 89.008,2320 \angle 2,1099^\circ V$$

$$V_{S(L-L)} = \sqrt{3} \cdot 89.008,2320 \angle 2,1099^\circ V = 154.166,7801 \angle 2,1099^\circ V = 154,1668 \angle 2,1099^\circ kV$$

Kemudian arus pada ujung pengirim bisa ditentukan dengan persamaan (21) sebagai berikut:

$$I_S = V_R Y \left(1 + \frac{YZ}{4}\right) + I_R \left(1 + \frac{YZ}{2}\right)$$

$$I_S = 86.024,4531 \cdot 4,8432 \cdot 10^{-8} \angle 90^\circ \left(1 + \frac{(4,8432 \cdot 10^{-8} \angle 90^\circ)(30,3953 \angle 48,2622^\circ)}{4}\right) + 144 \left(1 + \frac{(4,8432 \cdot 10^{-8} \angle 90^\circ)(30,3953 \angle 48,2622^\circ)}{2}\right)$$

$$I_S = 144,4754283 + j 0,004237116 A = 144,4754284 \angle 0,001680347^\circ A$$

Maka persentase regulasi tegangan bisa ditentukan dengan persamaan (22) sebagai berikut:

$$VR(\%) = \frac{\left[\frac{V_S}{1 + \frac{YZ}{2}}\right] - |V_R|}{|V_R|} 100\% = \frac{\left[\frac{154,1668}{0,999999451}\right] - [149]}{[149]} 100\% = 3,4677\%$$

Atau jatuh tegangan SUTT 150 kV adalah: $\Delta VR = 154,1669 - 149 = 5,1669 kV$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada proses penyaluran tegangan dari ujung pengirim ke ujung penerima SUTT 150 kV telah terjadi jatuh tegangan sebesar 5,1669 kV atau sebesar 3,4677 %. Besarnya jatuh tegangan pada SUTT 150 kV tersebut disebabkan karena adanya impedansi dan admitansi saluran. Jadi besarnya jatuh tegangan pada SUTT 150 kV dipengaruhi oleh impedansi dan admitansi saluran, dimana apabila impedansi dan admitansi saluran semakin besar maka jatuh tegangan pada SUTT 150 kV akan semakin besar pula. Begitupun sebaliknya apabila impedansi dan admitansi saluran semakin kecil maka jatuh tegangan pada saluran transmisi akan semakin kecil pula. Menurut BSN (2003) tegangan tertinggi dan tegangan terendah perbedaannya tidak lebih dari $\pm 10\%$ dari tegangan nominal sistem, berarti jatuh tegangan pada SUTT 150 kV dari PLTU Bukit Asam Tanjung Enim ke Gardu Induk Keramasan Palembang masih memenuhi standar yang telah ditetapkan.

2. Rugi-Rugi Daya Pada SUTT 150 kV

Dari data beban harian rata-rata Bulan Juli 2017 pada Tabel 1 dapat diketahui bahwa: $P_R = 32 MW$

Maka nilai daya pada ujung pengirim bisa ditentukan dengan persamaan (23) sebagai berikut:

$$P_S = \sqrt{3} V_S I_S \cos \theta_S = P_S = \sqrt{3} V_S I_S \cos(\theta_{V_S} - \theta_{I_S})$$

$$P_S = \sqrt{3} \cdot 154.166,7801 \cdot 144,4754284 \cdot \cos 2,108167133^\circ = 38.552.395,86 W = 38,5524 MW$$

Maka rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV adalah:

$$\Delta P = P_S - P_R = 38,5524 - 32 = 6,5524 MW$$

Persentase rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV adalah:

$$\Delta P(\%) = \frac{\Delta P}{P_S} 100\% = \frac{6,5524}{38,5524} 100\% = 17\%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada proses penyaluran daya dari ujung pengirim ke ujung penerima telah terjadi rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV sebesar 6,5524 MW atau sebesar 17 %. Besarnya rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV tersebut disebabkan karena terjadinya penurunan tegangan dari ujung pengirim ke ujung penerima sebesar 5,1669 kV atau sebesar 3,4677 %. Jadi besarnya rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV dipengaruhi oleh jatuh tegangan, dimana apabila jatuh tegangan semakin besar maka rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV akan semakin besar pula. Begitupun sebaliknya apabila jatuh tegangan semakin kecil maka rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV akan semakin kecil pula.

3. Efisiensi Saluran Transmisi 150 kV

Efisiensi penyaluran daya (η) bisa ditentukan dengan persamaan (25) sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} 100\% = \frac{32}{38,5524} 100\% = 83\%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada proses penyaluran daya dari ujung pengirim ke ujung penerima SUTT 150 kV, hanya sebesar 83 % atau daya sebesar 32 MW yang sampai ke ujung penerima. Berarti dalam proses penyaluran daya listrik terdapat 17 % atau sebesar 6,5524 MW daya yang hilang pada SUTT 150 kV. Semakin kecilnya efisiensi pada SUTT 150 kV disebabkan adanya penurunan tegangan pada ujung pengirim ke ujung penerima sebesar 5,1669 kV atau sebesar 3,4677 %. Jadi besar atau kecilnya efisiensi pada SUTT 150 kV dipengaruhi oleh jatuh tegangan, dimana apabila jatuh tegangan semakin besar maka efisiensi pada SUTT 150 kV akan semakin besar pula. Begitupun sebaliknya apabila jatuh tegangan semakin kecil maka efisiensi pada SUTT 150 kV akan semakin kecil pula.

V. KESIMPULAN

1. Tegangan pada ujung penerima adalah 149 kV, dan dari hasil perhitungan didapat tegangan pada ujung pengirim adalah 154,1668 $\angle 2,1099^\circ$ kV. Berarti pada SUTT 150 kV terdapat jatuh tegangan sebesar 5,1669 kV atau 3,4677 %. Berdasarkan BSN (2003) tegangan tertinggi dan tegangan terendah

perbedaannya tidak lebih dari $\pm 10\%$ dari tegangan nominal sistem. Berarti jatuh tegangan pada SUTT 150 kV dari PLTU Bukit Asam Tanjung Enim ke Gardu Induk Keramasan Palembang masih memenuhi standar yang telah ditetapkan.

2. Daya pada ujung penerima adalah 32 MW dari hasil perhitungan didapat daya pada ujung pengirim adalah 38,5524 MW. Maka rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV adalah 6,5524 MW atau sebesar 17 %. Besarnya rugi-rugi daya pada SUTT 150 kV disebabkan karena terjadinya penurunan tegangan dari ujung pengirim ke ujung penerima sebesar 5,1669 kV atau sebesar 3,4677 %.
3. Daya pada ujung penerima adalah 32 MW dari hasil perhitungan didapat daya pada ujung pengirim adalah 38,5524 MW. Maka efisiensi penyaluran daya pada SUTT 150 kV hanya sebesar 83 % atau daya sebesar 32 MW yang sampai ke ujung penerima. Berarti dalam proses penyaluran daya listrik terdapat 17 % atau sebesar 6,5524 MW daya yang hilang pada SUTT 150 kV. Semakin kecilnya efisiensi pada saluran transmisi atau penyaluran daya dari ujung pengirim sampai dengan ujung penerima disebabkan karena terjadinya penurunan tegangan pada ujung pengirim sampai dengan tegangan pada ujung penerima sebesar 5,1669 kV atau sebesar 3,4677 %.

DAFTAR PUSTAKA

- Arismunandar, Artono. (2001). *Teknik Tegangan Tinggi*. Indonesia. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Arismunandar, Artono dan Kuwahara, Susumu. (2004). *Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik: Saluran Transmisi*, Jilid II, Cetakan Ke 7. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2003). SNI 04-0227-2003 *Tegangan Standar*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Gonen, Turan. (2014). *Electrical Power Transmission System Engineering*, Third Edition. California State University, Sacramento, USA: CRC Press.
- Hutauruk, T.S. (1996). *Transmisi Daya Listrik*, Cetakan Ke 4. Jakarta: Erlangga.
- Kadir, Abdul. (1998). *Transmisi Tenaga Listrik*. Jakarta: Universitas Indonesia (UI Press).
- Stevenson, William D. (2000). *Analisa Sistem Tenaga Listrik*, Edisi Ke 4. Diterjemahkan Oleh: Kamal Idris. Jakarta: Erlangga